

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ШТОКА БУРОВОГО НАСОСА У8-6МА

Ю.Д.Петрина, А.В.Швадчак, Р.С.Яким

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024;

e-mail: [public@nuing.edu.ua](mailto:public@nuing.edu.ua)

*Осуществлен анализ напряженного состояния штоков буровых насосов двухстороннего действия на основе современных принципов механики деформированного твердого тела. Показано, что буровой раствор существенно влияет на коррозионно-усталостную прочность образцов стали 40Х, из которой изготавливают штоки. Изучено влияние конструкционных и технологических факторов изготовления штоков на запас коррозионно-усталостной прочности в среде бурового раствора.*

*The analysis of the density condition of the double-action boring pump's Rod is made on the basis of the modern principles of the hard bodies deformation mechanics. It's shown that the boring liquid has a big influence on corrosive fatigue strength on the samples made from steel 40X, which is used for production of rods. The influence of the Rod's construction and technological factors on the corrosive fatigue strength reserve in the liquid environment is explored.*

Однією з основних проблем у вдосконаленні бурових насосів є збільшення довговічності змінних деталей, а також зниження трудових і ресурсних затрат при виготовленні запасних частин до них. Високі показники напруження змінних деталей бурового насоса, зокрема штока, сприяють високим виробничим показникам, дають відчутну економію при експлуатації обладнання. Тому дослідження впливу напруженого стану штока бурового насоса на запас його міцності має важливе значення в структурі науково-дослідних робіт “Наукові обґрунтування раціональних режимів роботи та вибір основних параметрів бурового обладнання”, зазначених у плані національної програми “Нафта і газ України до 2010 року”.

На основі експлуатаційних випробовувань штоків бурових насосів [1] було встановлено, що штоки насоса У8-6МА, виготовлені за типовими технічними умовами, виходять з ладу не тільки внаслідок гідроабразивного зношення, але й під дією корозійного розтріскування робочих поверхонь. Було також зауважено часті випадки, коли неможливо від'єднати від штока відпрацьований поршень, що свідчило про руйнування різьбового з'єднання шток-гайки. Крім цього, при змінах поршня різьба часто руйнується. Аналіз типового технологічного процесу виготовлення штоків засвідчив необхідність впровадження ефективної зміцнюючої обробки, яка би максимально відповідала умовам експлуатації цих деталей. На думку авторів [2], для підвищення довговічності штока є перспективним використання поверхневого пластичного деформування з використанням ультразвукового впливу.

Вплив механоультразвукової обробки на формування напружено-деформованого стану зміцнених сталей досліджували такі вчені, як Артамонов Б.А., Абрамов О.В., Бабей Ю.І., Бережницька М.Ф., Петрина Ю.Д. та ін.

Суттєвий вплив на формування фізико-механічних властивостей і структурно-напруженого стану білих шарів здійснюють ультра-

звуківі коливання [3]. При механоультразвуковій обробці виникає значна пластична деформація, що супроводжується помірними температурами. Ця деформація розповсюджується на більшу глибину, ніж товщина білого шару.

Було встановлено, що в поверхневому шарі під дією ультразвуку формується залишкове стискаюче напруження, крім цього, проходить перерозподіл залишкових напружень по всій деталі, зменшується концентрація напружень коло пор, мікротріщин і т.д., що призводить до підвищення опору втомі і корозійної стійкості [4-9].

При випробовуваннях на корозійне розтріскування [8] встановлено, що корозійна витривалість залежить також і від розподілу залишкових напружень по перерізу поверхневого шару.

В роботі [10] зроблено важливий висновок про те, що на циклічну міцність зразків з середньовуглецевої сталі, зміцнених механоультразвуковою обробкою, суттєво впливає мікрогеометрія поверхні. При цьому фізико-механічні властивості зміцнених шарів меншою мірою визначають циклічну міцність. Разом з тим автор [11] показав, що для підвищення малоциклової втомі є сприятливим співвідношення міцності і в'язкості зміцненого металу.

Результати досліджень на корозійне розтріскування зразків з середньовуглецевої сталі, зміцнених механоультразвуковою обробкою, описані в [12, 13]. Було встановлено, що опір корозійному розтріскуванню таких зразків в 20%-ному розчині сірчаної кислоти збільшується в 1,8 рази порівняно з шліфованими. При роботі деталей при температурах 150-200°C спостерігалось підвищення корозійної витривалості до 18%. Автори пояснювали це виділенням дрібнодисперсних карбідів та інтенсивним розпадом метастабільного залишкового аустеніту, а також великою гомогенізацією структури.

Що стосується даних про вплив напруженого стану штока насоса на його корозійно-

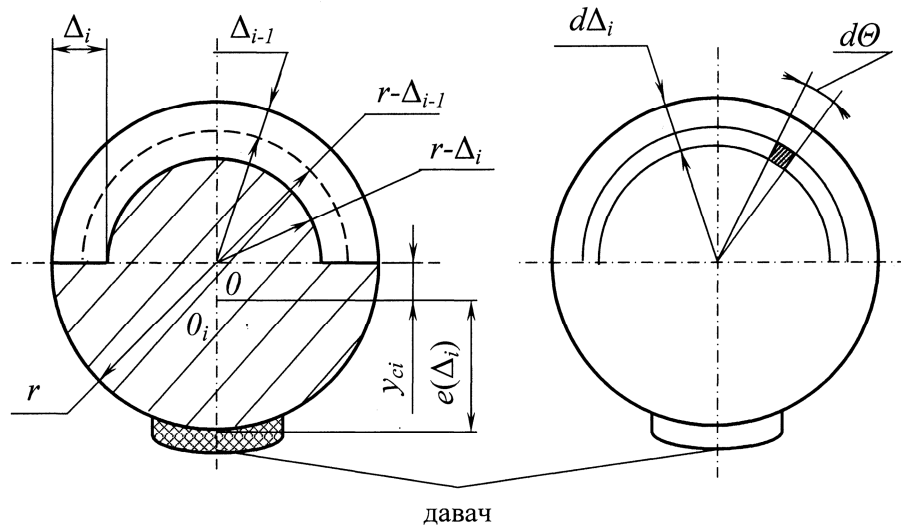


Рисунок 1 — Схема до визначення залишкових напружень в циліндричному зразку

втомну міцність, то вони практично відсутні. Існуючі розрахунки штоків бурових насосів двосторонньої дії ґрунтуються на теоретичному знаходженні: коефіцієнта запасу міцності за текучістю матеріалу штока [14], або запасу міцності, що враховує ефективний коефіцієнт концентрації напружень [15]. Це здебільшого не дає можливості провести ґрунтовний аналіз впливу технологічних і експлуатаційних факторів на довговічність штока. Тому в роботі було поставлене завдання дослідити вплив механоультразвукового зміцнення на запас втомливої міцності штока.

Залишкові осьові напруження I роду в поверхневих шарах циліндричних зразків визначали за методикою, описаною в роботах [16, 17]. В основі цієї методики лежить принцип вимірювання деформації, що виникає внаслідок порушення рівноважного стану зразка при пошаровому травленні металу по його напівциліндричній поверхні (рис. 1)

На основі робіт [16] виведена розрахункова формула для визначення залишкових напружень після травлення шару товщиною

$$\delta_i = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n; \quad (1)$$

$$\sigma_{зал} = -B \frac{d\varepsilon}{d\delta_i} + E \int_0^{\delta_i} A(\delta_{i-1}) d\delta_{i-1}; \quad (2)$$

$$B = \frac{E}{\left( \frac{(2(r - \delta_i) + \pi y_{ci}) e(\delta_i)}{I_{\delta_i}} - \frac{\pi}{S_{\delta_i}} \right) (r - \delta_i)}; \quad (3)$$

де:  $r$  – радіус зразка;  
 $\delta_i$  – сумарна товщина знятого шару;  
 $\delta_{i-1}$  – знятий попередній шар;  
 $y_{ci}$  – центр тяжіння перерізу після усунення шару;

$$y_{ci} = \frac{4((r - \delta_i)^3 - r^3)}{3\pi((r - \delta_i)^2 + r^2)}; \quad (4)$$

$e(\delta_i)$  – відстань від центра тяжіння до нижнього волокна;

$I_{\delta_i}$  – момент інерції зразка після травлення шару товщиною  $\delta_i$

$$I_{\delta_i} = \frac{\pi}{8} ((r - \delta_i)^4 - r^4); \quad S_{\delta_i} = \frac{\pi}{2} ((r - \delta_i)^2 + r^2). \quad (5)$$

Похідні  $\frac{d\varepsilon}{d\delta_i}$  підраховуються на основі експериментальних даних за допомогою параболічної апроксимації.

$$A(\delta_{i-1}) = \left\{ \frac{(2(r - \delta_{i-1}) + \pi y_{ci-1})(r - \delta_{i-1} + y_{ci-1})}{I_{\delta_{i-1}}} + \frac{\pi}{S_{\delta_{i-1}}} \right\} \cdot \left\{ \frac{(2(r - \delta_{i-1}) + \pi y_{ci-1}) e(\delta_{i-1})}{I_{\delta_{i-1}}} - \frac{\pi}{S_{\delta_{i-1}}} \right\}^{-1}. \quad (6)$$

Залишкові осьові напруження, що виникають в результаті досліджуємих видів обробки, визначали на зразках діаметром 20 мм і довжиною 150 мм. Для замірів деформації, що виникає в зразку при знятті шарів металу, використовували електричні тензоміри опору (ФК-П-20-200), які наклеювали на досліджувані зразки.

Електролітом для травлення зразків служив розчин такого складу: 100 г сірчанокислого цинку і 50 г хлористого натрію на 1 л дистильованої води. Використання даного електроліту забезпечує припинення процесу травлення при відсутності струму та рівномірним травленням металу по поверхні зразка при подачі струму 5 А/дм<sup>2</sup>, а також можливість травлення при кімнатній температурі. Для забезпечення необхідної достовірності даних криві будувалися як середні від випробовування трьох зразків.

Втомні випробовування зразків проводили за присутності лабораторного бурового розчину, рекомендованого авторами [18] для використання при дослідженнях на корозійно-втомні випробовування. Лабораторний буровий розчин складається з відстою водяного глинистого

розчину (вміст твердої фази 5-7% від об'єму), мінералізованого 3%-ним вмістом NaCl з домішками 5% конденсованої сульфат-спиртової барди і 0,5% піногасника П-79. Даний вибір був обґрунтований тим, що цей розчин досить точно імітує властивості бурових розчинів, які найбільш широко використовуються при бурових роботах.

Випробовування здійснювали на машинах ИМА-30, що дають можливість випробовувати зразки діаметром 10-30 мм в робочій частині та чистим циклічним згином з частотою 50 Гц згідно з методикою, описаною в [16, 19]. Відповідно до цього при згині симетричним циклом в корозійному середовищі призначали  $N=50 \times 10^6$  циклів навантаження. Прийнята база випробовувань дає змогу з достатньою достовірністю судити про характер кривих втоми в корозійних середовищах. Для випробовувань виготовляли зразки циліндричної форми діаметром 20 мм згідно з рекомендаціями [19]. Для оцінки впливу концентраторів напружень на корозійно-втомну міцність були проведені випробовування зразків з V-подібним надрізом на глибину 2,5 мм і радіусом при вершині 0,1 мм.

Подачу середовища в зону робочої частини зразків при випробовуванні здійснювали капанням з частотою, яка забезпечує надійну змочуваність зразків, що обертаються.

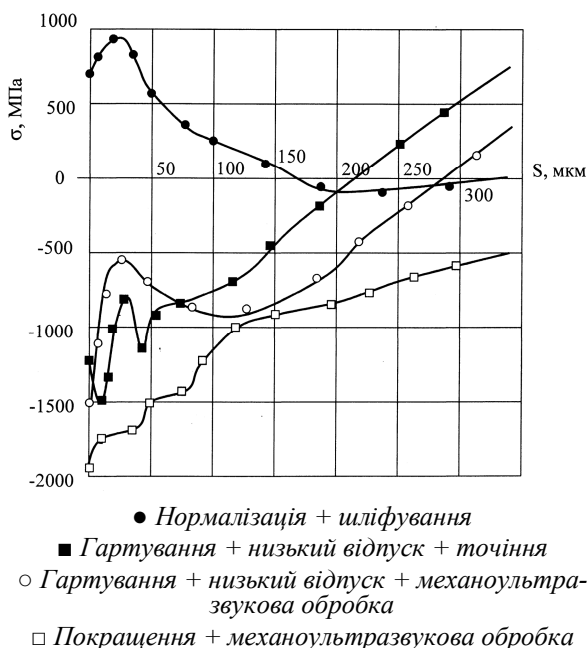
Експериментам підлягали зразки зі сталі 40Х, яка використовується для виготовлення штоків. Для зміцнення зразки попередньо піддавали гартуванню в масло при  $t = 850^\circ\text{C}$  з наступним низьким відпуском при  $t = 180^\circ\text{C}$ , а також проводили нормалізацію та покращання.

Шорсткість поверхні перевіряли за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 згідно з відомою методикою [20].

Механоультразвукову обробку здійснювали на верстаті 1К62 при подачі  $S=0,11$  мм/об, навантаженні твердосплавного різця на зразок  $P=1000$  Н, частоті обертів  $n=630$  об/хв, глибини різання  $t=0,02$  мм. Ультразвуковий вплив здійснювали за допомогою магнетострикційної головки з робочою частотою 20 кГц.

Визначення залишкових макронапружень засвідчило, що в результаті досліджуваних видів обробки загартованих і низьковідпущених, а також поліпшених і нормалізованих зразків виникають залишкові напруження стиску, що досягають в поверхневих шарах значних величин (рис. 2) порівняно з шліфованими зразками. Такий розподіл напружень виникає через збільшення питомих об'ємів зміцнених шарів порівняно з серцевиною. У результаті попередньої термічної обробки та подальшої пластичної деформації проходять фазові перетворення масоперенесення (збільшення вмісту вуглецю, хрому і т.д.).

Аналіз отриманих даних на основі [8] засвідчив, що найбільш сприятливою епюрою залишкових напружень з точки зору високого опору втомному і корозійно-втомному руйнуванню, а також покращання інших експлуатаційних характеристик є зміцнення механоультразвуковою обробкою після попереднього по-



**Рисунок 2 — Епюри залишкових макронапружень в зразках з сталі 40Х**

кращання, а також гартування з низьким відпуском (рис. 2). Для даного виду обробки залишкові напруження переходять в розтягуючі на найдавший відстані від поверхні. Це зумовлено значним розповсюдженням пластичної деформації, спричиненої накладанням ультразвукових коливань в зону пластичної деформації інтенсивним оброблюваних зразків.

При дослідженнях на корозійно-втомну міцність спостерігали збільшення значення умовної межі корозійної втоми зразків, зміцнених механоультразвуковою обробкою (табл. 1, 2).

Спостерігали збільшення приблизно в 5,5 рази умовної межі корозійної втоми зразків, загартованих і низьковідпущених порівняно з шліфованими (рис. 3).

У випадку обробки покращаних і нормалізованих сталей тих же марок корозійно-втомна міцність збільшилася приблизно в 2-3,4 рази порівняно з шліфованими (рис. 4).

Підвищення корозійно-втомної міцності зразків пояснюється дрібнозернистою структурою мартенситу білого шару.

Аналіз результатів засвідчив, що мікрогеометрія поверхні досліджуваних сталей не має домінуючого значення при випробовуваннях на корозійно-втомну міцність в даних умовах. Проте менша шорсткість позитивно впливає на стійкість до корозійно-втомного руйнування (табл. 1, 2).

Дані, отримані з випробовувань зразків з концентратором напружень, засвідчили незначне зниження корозійно-втомної витривалості порівняно з гладкими зразками (табл. 1, 2) на відміну від помітнішого зменшення при токарній обробці. Це може бути пояснено сприятливішим розподілом внутрішніх напружень, що виникли в результаті механоультразвукової зміцнення порівняно з токарною обробкою.

Таблиця 1 — Корозійно-втомна міцність гладких зразків зі сталі 40Х

Термообробка	Метод створення білого шару	Шорсткість $R_a$ , мкм	$\sigma_{-1}^N$ , МПа	$\beta$
гартування + низький відпуск	шліфування	0,32	45	1
	механоультразвукова обробка	0,16	250	5,55
	токарна	0,63	160	3,5
покращання	шліфування	0,8	70	1
	механоультразвукова обробка	0,16	240	3,42
	токарна	0,63	200	2,86

$$\beta = \frac{\sigma_{-1}(\text{зміцнений})}{\sigma_{-1}(\text{вихідний})}$$

Таблиця 2 — Корозійно-втомна міцність зразків зі сталі 40Х з концентратором

Термообробка	Метод створення білого шару	Шорсткість $R_a$ , мкм	$\sigma_{-1}^N$ , МПа	$\beta$
гартування + низький відпуск	шліфування	0,32	35	1
	механоультразвукова обробка	0,16	190	5,43
	токарна	0,63	90	2,57
покращання	шліфування	0,8	56	1
	механоультразвукова обробка	0,16	180	3,21
	токарна	0,63	150	2,68

Необхідно зауважити, що на опір втомі зразків в умовах корозії впливає масштабний фактор [21]. З метою вивчення цього питання на зміцнених механоультразвуковою обробкою зразках змінювали їх діаметр від 10 до 30 мм. Оскільки небезпечним перерізом штока є різьба, то випробовування проводили на зразках з концентратором напружень. Результати випробовувань наведені на рис. 5. Одержані дані вказують на те, що зі збільшенням розмірів зразків в досліджуваних межах зростає корозійно-втомна витривалість. Причому у зразках, що пройшли покращання, спостерігається різкіше збільшення корозійно-втомної витривалості за рахунок сприятливішого співвідношення міцності і в'язкості матеріалу в поперечному перерізі.

З огляду на вищевказане є ефективним та перспективним використання механоультразвукової технологічної обробки після гартування і низького відпуску та покращання при виготовленні штока бурового насоса.

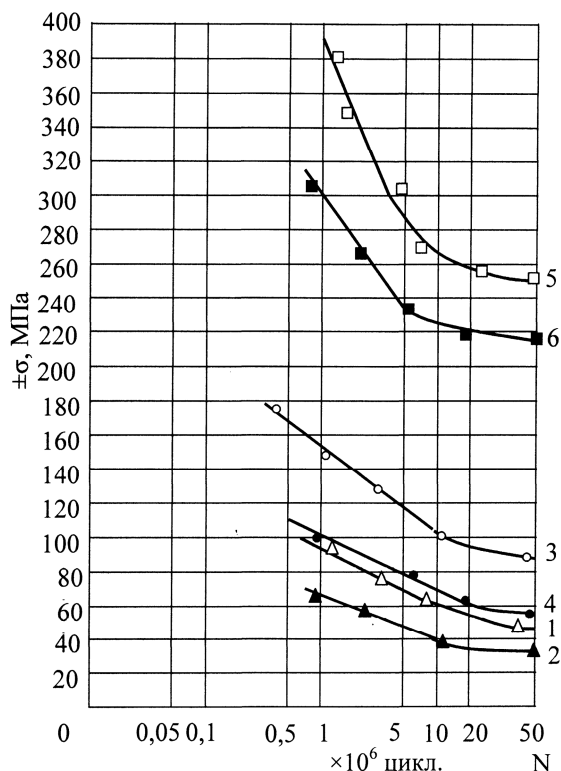
Отже, напружений стан та фізико-механічні властивості зміцнених шарів, отриманих механоультразвуковою обробкою, забезпечують ефективне підвищення корозійно-втомної міцності середньовуглецевої сталі в присутності бурового розчину. Хоч мікрогеометрія поверхні зразків не має домінуючого впливу на корозійно-механічну витривалість в буровому

розчині з рН7 і нижче, проте менша шорсткість позитивно впливає на стійкість до корозійно-механічного руйнування. Використання механоультразвукового зміцнення різьби штока, в результаті чого було зменшено шорсткість поверхні з  $R_a$  5 до  $R_a$  0,16 мкм, дало можливість підвищити довговічність штока в 1,8 рази.

В подальшому актуальним є проведення натурних експериментів для визначення меж витривалості штока для уточнення окремих факторів на його запас міцності.

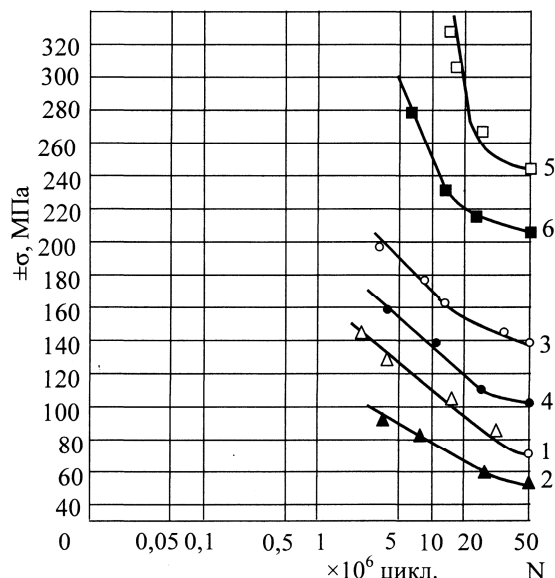
### Література

- Петрина Ю.Д., Швадчак А.В., Яким Р.С. Аналіз умов виготовлення штоків бурових насосів та їх експлуатаційні характеристики // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2005. — № 1(14). — С.64-68.
- Петрина Ю.Д., Яким Р.С., Швадчак А.В. Шляхи підвищення довговічності деталей машин насосів і компресорів нафтогазової промисловості. // Матеріали 8-ї міжнародної науково-практичної конференції „Нафта і газ України — 2004” (Судак, 29 вересня-1 жовтня). Том 2. — К.: Українська нафтогазова академія, 2004. — С. 223-225.
- Бабей Ю.И., Рябов Б.Ф., Голубец В.М., Дяченко Б.Т., Канарова Л.А. О природе белых слоёв, возникающих в процессе некоторых



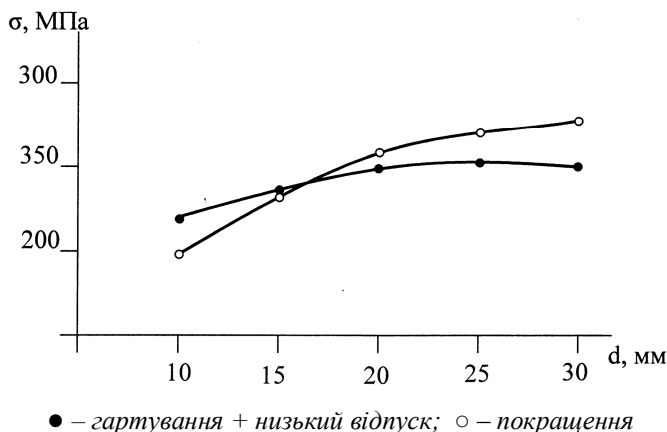
1 – шліфування (гладкі); 2 – шліфування (з концентратором); 3 – токарна обробка (гладкі); 4 – токарна обробка (з концентратором); 5 – механоультразвукова обробка (гладкі); 6 – механоультразвукова обробка (з концентратором)

**Рисунок 3 — Криві корозійно-втомної міцності зразків з загартованої і низьковоідпущеної сталі 40Х**



1 – шліфування (гладкі); 2 – шліфування (з концентратором); 3 – токарна обробка (гладкі); 4 – токарна обробка (з концентратором); 5 – механоультразвукова обробка (гладкі); 6 – механоультразвукова обробка (з концентратором)

**Рисунок 4 — Криві корозійно-втомної міцності зразків з покращаної сталі 40Х**



● – гартування + низький відпуск; ○ – покращення

**Рисунок 5 — Залежність корозійно-втомної міцності зразків з концентраторами зі сталі 40Х, зміцнених механоультразвуковою обробкою від їх діаметра**

видов обробки сталі // Физико-химическая механика материалов. – 1973. – Т.9. – № 4. – С.33-39.

4. Погодина-Алексеева К.М. Влияние ультразвуковых колебаний на диффузионные процессы // НТО Машпром. – 1962. – 36 с.

5. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожаева В.И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособие в 2х томах. Т.1. Обработка мате-

риалов с применением инструмента / Под ред. В.П.Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 247 с.

6. Абрамов О.В., Хорбенко И.Т., Швигла Ш. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 266 с.

7. Бережницкая М.Ф. Остаточные макронапряжения, возникшие при импульсном упрочнении деталей // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – № 3. – С.64-68.

8. Бережницкая М.Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление стали коррозионно-механическому разрушению // Физико-химическая механика материалов. – 1987. – № 1. – С. 22-26.
9. Бережницкая М.Ф., Грицишин П.М. Формирование остаточных напряжений в поверхностных слоях комплексной обработкой // Физико-химическая механика материалов. – 1989. – № 1. – С. 104-105.
10. Бабей Ю.И., Стоцкий И.М. Влияние механоультразвуковой обработки на циклическую прочность деталей // Состояние и перспективы промышленного освоения вибрационной обработки. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1974. – С. 157-160.
11. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наукова думка, 1988. – 240 с.
12. Петрина Ю.Д., Швадчак А.В., Стоцкий И.М., Тарасевський С.І. Вплив механоультразвукової обробки на опір корозійному розтріскуванню деталей нафтогазової промисловості // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – №3(12). – С. 87-90.
13. Стоцкий И.М. Влияние механоультразвуковой обработки на сопротивление стали коррозионному растрескиванию // Физико-химическая механика материалов – 1980. – № 6. – С. 101-103.
14. Ильский А.Л., Миронов Ю.В., Чернобильский А.Г. Расчет и конструирование бурового оборудования. – М.: Недра, 1985. – 452 с.
15. Северинчик Н.А. Машины и оборудование для бурения скважин. – М.: Недра, 1986. – 368 с.
16. Карпенко Г.В., Бабей Ю.И., Карпенко И.В., Гутман Э.М. Упрочнение стали механической обработкой. – К.: Наукова думка, 1966. – 202 с.
17. Бабей Ю.И., Бережницкая М.Ф. Метод определения остаточных напряжений первого рода. – Львов: Львов. науч. б-ка им. В. Стефаника, 1980. – 66 с.
18. Северинчик Н.А., Маснык О.Т., Копей Б.В. Коррозия и коррозионная устойчивость подземного бурового оборудования. – Львов: Вища школа, 1981. – 143 с.
19. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
20. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – К.: Наукова думка, 1984. – 272 с.
21. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.

УДК 622.242.6

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КЛАПАНА З ДЕМПФЕРНОЮ КАМЕРОЮ ДЛЯ БУРОВОГО НАСОСА МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Б.В.Копей, В.Б.Копей, І.Д.Лівак, С.С.Чаплінський

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353;  
e-mail: kopeyb@nuing.edu.ua

*С помощью метода конечных элементов получен общий вид распределения скоростей потока и кинетической энергии турбулентности в клапане с демпферной камерой для бурового насоса при нагнетании и всасывании, определены зависимости коэффициента расхода клапана и щелей демпферной камеры от величины подъема тарелки. Результаты исследований могут быть использованы в математической модели, которая описывает работу такого клапана.*

Порівняно з клапаном бурового насоса звичайної конструкції тарілка та сідло клапана з демпферною камерою містять додаткові конструктивні елементи, які в момент посадки тарілки утворюють між сідлом і тарілкою камеру підвищеного тиску [1]. Вважається, що застосування демпферної камери зменшить ударні навантаження при посадці тарілки. Однак для розробки працездатної конструкції потрібно вирішити такі основні проблеми:

*The general type of flow speeds distribution and kinetic energy of turbulence in a valve with a damper chamber for a mud pump at discharge and suction is obtained by the finite element method. Dependences of coefficient of flow rate for valve and clearances in damper chamber on the size of plate rising are presented. Result of researches can be used in a mathematical model which describes the work of such valve.*

1. Розрахувати оптимальний розмір щілин демпферної камери.
2. Визначити швидкість посадки тарілки на сідло.
3. Попередити гідроабразивне спрацювання сідла і тарілки клапана в зоні щілин демпферної камери внаслідок високих швидкостей потоку.

Перші дві проблеми можна вирішити за допомогою математичної моделі роботи клапана бурового насоса з демпферною камерою.